

提高双馈风电机组 LVRT 能力的改进直接功率控制

邵昊舒,王 磊,蔡 旭

(上海交通大学 风力发电研究中心,上海 200240)

摘要:双馈风力发电系统采用传统直接功率控制时,在发生低电压穿越(LVRT)后转子电流振荡较大,易引起Crowbar再动作。建立传统直接功率控制下双馈风力发电系统的模型,对矢量控制和直接功率控制抑制LVRT的效果进行分析,在此基础上提出一种改进型直接功率控制方法。引入谐振调节器消除定子磁链动态分量对转子磁链的作用,抑制Crowbar切除后转子电流的动态分量,从而改善双馈风电机组LVRT特性。仿真比较验证了所提控制方法应用于双馈风力发电系统的可行性,该控制方法比矢量控制使系统更快恢复稳定,且比传统直接功率控制对转子电流振荡抑制效果更明显。

关键词:直接功率控制;矢量控制;双馈风力发电机;低电压穿越

中图分类号:TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.003

0 引言

中国是风能资源最丰富的国家之一,开采和利用风能的潜力巨大^[1-3]。风力发电系统从早期的恒速恒频系统发展为现今的变速恒频系统,不仅大幅提高了转换效率,降低了原动机承受的机械应力,而且还能实现有功、无功功率的解耦控制,提高电力系统的调节能力及稳定性^[4]。其中基于双馈感应电机DFIG(Doubly Fed Induction Generator)的风力发电系统由于其变换器的功率只有额定发电机的25%~30%,是目前变速恒频风电机组的主流机型。

目前已有多种控制策略应用于双馈风力发电系统^[5-6],应用最广泛的是电压或磁链定向的矢量控制VC(Vector Control)^[7-8],它是在定子电压或磁链定向的旋转坐标系中将转子电流分解为有功分量和无功分量,采用外部功率环、内部电流环结合比例积分(PI)控制器进行调节。相关研究和实验均表明,矢量控制可以获得较好的稳态性能,但是对参数的依赖性较强,多PI控制器的参数也为调试带来了较大困难^[9]。

近年来,直接功率控制DPC(Direct Power Control)被应用于双馈风力发电系统并得到学者的广泛关注,该方法具有实施简单、动态响应快、鲁棒性好、对参数依赖小等优点^[10]。查表法的直接功率控制LUT-DPC(Look Up Table DPC)^[11]的主要缺点是开关频率不固定,不利于滤波器的设计,且对系统采样频率要求很高。采用结合空间矢量调制的直接功率控制SVM-DPC(Space Vector Modulation DPC)方法,可以有效实现开关频率固定,且直流电压利用率

高^[12-13],但实验表明其稳态效果不如矢量控制。文献[14]将终端滑模变结构应用于双馈感应发电机的直接功率控制中,通过控制两相转子电压直接控制系统定子侧的有功、无功功率。文献[15]提出一种结合矢量控制和直接功率控制的策略,融合二者架构设计的新型控制器具有鲁棒性高、谐波输出小等优点。文献[16]针对直驱型风电机组采用预测直接功率控制的策略,使得系统具有参数设计简单、动态响应快、输入电流畸变低等特点。文献[17]研究结合预测控制的直接功率控制P-DPC(Predictive DPC)方法,该方法在减小功率误差的同时,保持直接功率控制的固有快速动态响应特征,解决了动、稳态性能的矛盾,但P-DPC方法算法复杂,计算量大,实现比较困难。文献[18]提出基于滑模变结构的双馈风力发电机直接功率控制策略,具有较好的参数鲁棒性,但由于惯性等原因使系统在光滑滑动模态上叠加了一个自振,且无法消除。

本文提出一种改进的双馈风力发电机直接功率控制策略,与传统的直接功率控制相比,其能有效解决低电压穿越(LVRT)后转子电流振荡的问题。在RTDS实时仿真平台上建立双馈风力发电系统模型,通过硬件在环仿真证实该控制方法的有效性,结果表明其能满足目前风电机组的LVRT要求。

1 双馈风电机组的直接功率控制

双馈风电机组由于出色的控制性能成为目前风电场中的主流机型^[19-20],其定子绕组和电网直接相连,转子绕组通过三相背靠背变流器与电网连接,以实现交流励磁,其拓扑结构如图1所示。图中, s 为双馈风电机组的转差率; P_s 、 Q_s 分别为双馈发电机定子侧有功功率和无功功率。和传统矢量控制方式相比,双馈风电机组的直接功率控制能够简化控制系统结构,并且具备更快的动态响应性能以及更好的鲁棒性,因此成为双馈风电机组控制的主要研究

收稿日期:2018-12-24;修回日期:2019-05-17

基金项目:深远海风电与柔直的匹配适应控制关键技术研究(16DZ1203402)

Project supported by the Key Research on Matching Control of VSC-HVDC and Offshore Wind Power(16DZ1203402)

方向之一^[21-22]。

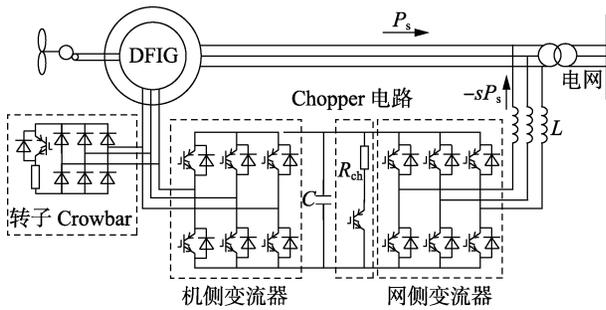


图1 双馈异步风力发电机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of DFIG wind turbine

在双馈风电机组的直接功率控制中,若保持电网电压恒定,且忽略定子电阻的影响,则可得转子侧变流器的输出电压参考值为:

$$\begin{cases} u_{rd}^* = \frac{1}{k_\sigma U_s} \frac{P_s^* - P_s}{T_s} - \omega_{slip} \left(\frac{Q_s}{k_\sigma U_s} - \frac{L_r}{L_m} \frac{U_s}{\omega_1} \right) + R_r i_{rd} \\ u_{rq}^* = -\frac{1}{k_\sigma U_s} \frac{Q_s^* - Q_s}{T_s} - \omega_{slip} \frac{P_s}{k_\sigma U_s} + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_{rd}^* 和 u_{rq}^* 分别为 DFIG 转子侧变流器的输出电压参考值在同步速旋转坐标系下的 d 、 q 轴分量; i_{rd} 和 i_{rq} 分别为转子电流的 d 、 q 轴分量; U_s 为发电机定子电压; ω_{slip} 为双馈发电机的转差; R_r 为双馈发电机的转子电阻; L_r 与 L_m 分别为双馈发电机的转子电感与激磁电感; k_σ 为直接功率控制下的控制系数; T_s 为系统的采样周期。

为了消除静差,用 PI 控制器取代式(1)中的比例控制器,并忽略转子电阻压降,此时式(1)可改写成以下形式:

$$\begin{cases} u_{rd}^* = \left(k_{pp} + \frac{k_{ip}}{s} \right) (P_s^* - P_s) - \omega_{slip} \left(\frac{Q_s}{k_\sigma U_s} - \frac{L_r}{L_m} \frac{U_s}{\omega_1} \right) \\ u_{rq}^* = -\left(k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s} \right) (Q_s^* - Q_s) - \omega_{slip} \frac{P_s}{k_\sigma U_s} \end{cases} \quad (2)$$

其中, k_{pp} 、 k_{ip} 、 k_{pq} 、 k_{iq} 分别为 d 轴与 q 轴 PI 控制器的比例系数与积分系数。

由式(2)可得双馈风电机组的直接功率控制框图如图2所示。图中, u_{rd}^* 和 u_{rq}^* 为转子端电压在静止两相坐标系下的给定值; S_a 、 S_b 、 S_c 为转子侧变流器三相开关函数; ω_r 为转子转速; θ_r 为转子位置角; U_{sabc} 和 I_{sabc} 分别为定子三相电压和电流; $U_{sq\beta}$ 和 $I_{sq\beta}$ 分别为定子三相电压和电流在两相静止坐标系下的分量。

2 电网电压跌落下直接功率控制和矢量控制的电磁暂态分析

为了研究电网电压跌落情况下不同控制方式的电磁暂态特征,将转子侧变流器分别采用矢量控制

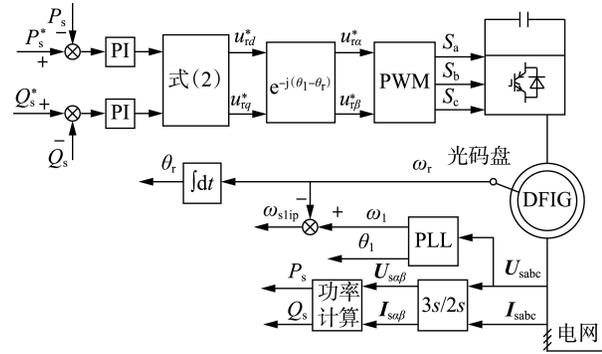


图2 DFIG 直接功率控制框图

Fig.2 Control diagram of DPC for DFIG

和直接功率控制,忽略网侧变流器的影响,且不考虑 Crowbar 等硬件保护电路的投入。

dq 同步速坐标系下双馈发电机的定子电压分量 u_{sd} 、 u_{sq} , 转子电压分量 u_{rd} 、 u_{rq} , 定子磁链分量 ψ_{sd} 、 ψ_{sq} , 转子磁链分量 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 分别为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

其中, ω_s 为同步转速; L_s 为发电机的定子电感。

虽然矢量控制和直接功率控制最终输出的控制信号都是转子电压,但矢量控制本质上控制的是转子电流,而直接功率控制本质上控制的是转子磁链。双馈电机是一个含有众多状态变量的复杂机电系统,将转子磁链、转子电流分别作为被控状态量,可以得到不同的控制效果。

矢量控制将转子电流作为被控状态量,得到的状态方程组为:

$$\begin{cases} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \frac{di_{rd}}{dt} = u_{rd} - R_r i_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} - \frac{L_m}{L_s} (u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_s \psi_{sq}) \\ \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \frac{di_{rq}}{dt} = u_{rq} - R_r i_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} - \frac{L_m}{L_s} (u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s \psi_{sd}) \end{cases} \quad (5)$$

直接功率控制将转子磁链作为被控状态量,得到的状态方程组为:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{rd}}{dt} = u_{rd} - R_r i_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} = u_{rq} - R_r i_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (6)$$

上述状态方程中的各变量都是瞬时值,且计及了双馈电机磁链的动态变化,所以可应用于研究双馈电机的电磁暂态过程。

假设电网电压在 t_0 时刻发生三相对称跌落,根据磁链守恒原则,电机定子磁链 ψ_s 的变化轨迹如图 3 所示。在静止坐标系中,电网电压跌落前的定子磁链轨迹为 l_1 ,电网电压跌落后由于磁链守恒产生直流衰减量 ψ_{dc} ,轨迹为 l_2 ,稳定后定子磁链轨迹变为 l_3 。在同步速旋转坐标系中,电网电压跌落前定子磁链为 ψ_{s0} ,稳定后为 ψ_{s1} ,跌落后且稳定前定子磁链为 $\psi_{s1} + \psi_{dc}$ 。在电网电压跌落后的暂态过程中,由于定子磁链的直流分量而引起定子磁链的周期性脉动造成控制系统不稳定,且会导致转子过电流烧坏转子侧变流器,因此应该使定子磁链的直流分量 ψ_{dc} 尽快衰减至 0,有学者将这种控制思想称之为“灭磁”。

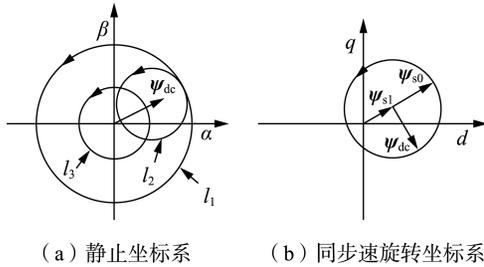


图 3 电压跌落前后 DFIG 定子磁链轨迹示意图

Fig.3 Track diagrams of DFIG stator flux linkage before and after voltage drop

根据同步速旋转坐标系中双馈电机定子电压方程,电压跌落后的稳态定子磁链状态方程为:

$$\frac{d\psi_{s1}}{dt} = U_s - i_{s1} R_s - j\omega_s \psi_{s1} = 0 \quad (7)$$

其中, i_{s1} 为电网电压跌落后的稳态定子电流。稳定前的定子磁链状态方程为:

$$\frac{d(\psi_{s1} + \psi_{dc})}{dt} = U_s - i_{s1} R_s - j\omega_s (\psi_{s1} + \psi_{dc}) \quad (8)$$

综合式(7)和式(8)可得:

$$\frac{d\psi_{dc}}{dt} = -(i_s - i_{s1}) R_s - j\omega_s \psi_{dc} \quad (9)$$

其中, i_s 为电网电压跌落前的稳态定子电流。

由于 $j\omega_s \psi_{dc}$ 仅使得 ψ_{dc} 向着与自身垂直的方向变化,因此对 ψ_{dc} 幅值大小不起作用,从而 ψ_{dc} 幅值仅受到 $(i_s - i_{s1}) R_s$ 的影响。

矢量控制下,转子电流 i_r 受转子电压直接控制,故能较快进入稳定状态,灭磁过程中可近似认为转子电流为常数,由双馈电机磁链方程可以得到:

$$i_s - i_{s1} = \frac{L_r \psi_s - L_m L_r i_r}{L_r L_s} - \frac{L_r \psi_{s1} - L_m L_r i_r}{L_r L_s} = \frac{L_r \psi_{dc}}{L_r L_s} \quad (10)$$

根据式(10),得到采用矢量控制下电网电压跌落时定子磁链直流分量的导数为:

$$\frac{d|\psi_{dc}|}{dt} = -\frac{L_r |\psi_{dc}| R_s}{L_r L_s} \quad (11)$$

直接功率控制下,转子磁链 ψ_r 受转子电压直接控制,故能较快进入稳定状态,灭磁过程中可近似认为转子磁链为常数,由双馈电机磁链方程可以得到:

$$i_s - i_{s1} = \frac{L_r \psi_s - L_m \psi_r}{L_r L_s - L_m^2} - \frac{L_r \psi_{s1} - L_m \psi_r}{L_r L_s - L_m^2} = \frac{L_r \psi_{dc}}{L_r L_s - L_m^2} \quad (12)$$

此时定子磁链直流分量的导数为:

$$\frac{d|\psi_{dc}|}{dt} = -\frac{L_r |\psi_{dc}| R_s}{L_r L_s - L_m^2} \quad (13)$$

比较式(11)和式(13)可得,直接功率控制下直流分量的导数明显小于矢量控制下的,且 2 个导数都为负数,因此采用直接功率控制在电网电压跌落时的电磁暂态过程中更利于直流灭磁,抑制系统振荡。

3 改进直接功率控制

在双馈风电机组上对矢量控制和直接功率控制下的 LVRT 效果进行分析,由于 Crowbar 动作时间极短,在 Crowbar 投入期间,转子侧变流器闭锁,因此在 Crowbar 投入期间 2 种控制方式下双馈电机的特性基本一致,双馈发电机相当于并网鼠笼异步电机,主要的差异在于 Crowbar 切除后,不同控制方式下机组的响应方式不同,从控制的稳定性角度分析,希望机组能快速进入稳定状态且不会引起 Crowbar 的再次动作。

在 Crowbar 切除时,由于矢量控制本质上是控制转子电流,直接功率控制本质上是控制转子磁链,因此二者的暂态特性有所不同。本节主要分析电网电压恢复后 Crowbar 切除的暂态过程,同时考虑到发电机转动惯量的时间常数相对较大,电磁暂态过程中系统电气量的变化速度远大于机械转速的变化速度,因此以下的分析中均可认为发电机的转速保持恒定。

在第 2 节中已经分析得到,矢量控制具有抑制转子电流振荡的作用效果,SVM-DPC 能够使系统快速稳定,具有比矢量控制更好的优势,但转子电流振荡较严重,在 Crowbar 切除后更易引起 Crowbar 再次动作,所以需要改进 SVM-DPC,抑制转子电流的较

大振荡。

考虑 SVM-DPC,以 d 轴为例,转子磁链环的控制框图如图 4 所示。

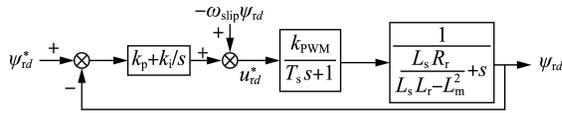


图 4 转子磁链环结构

Fig.4 Closed loop of rotor flux linkage

当开关频率足够高,即 T_s 足够小时,PWM 变流器传递函数简化为 1,则得到其简化后的控制框图如图 5 所示。

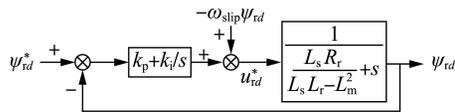


图 5 简化转子磁链环结构

Fig.5 Simplified closed loop of rotor flux linkage

在 Crowbar 切除时刻,可以认为转子磁链的给定保持不变,分析转子磁链在暂态过程中以动态分量形式表示的回路,如图 6 所示。

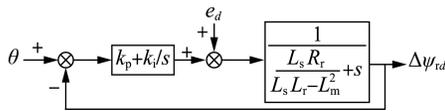


图 6 暂态过程中的 d 轴回路

Fig.6 d -axis closed loop in dynamic process

图 6 对应的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{\Delta\psi_{rd}}{e_d} = \frac{1}{(k_p + k_i/s) + \left(\frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} + s\right)} = \frac{G_d}{k_p + k_i/s} \quad (14)$$

其中, $e_d = -L_m R_r \Delta\psi_{sd} / (L_r L_s - L_m^2)$; G_d 为转子磁链 d 轴分量变换传递函数; $\Delta\psi_{sd}$ 为定子磁链的 d 轴动态分量,而其中只含有角频率为 $\omega = \omega_1$ 的分量,该频率相对该磁链环的截止频率而言很小,所以转子磁链 d 轴传递函数 $G_d \approx 1$ 。从而有:

$$G_1(s) \approx \frac{1}{k_p + k_i/s} \approx \frac{1}{k_p} \frac{s}{s + k_i/k_p} \quad (15)$$

其中, $k_i/k_p = L_s R_r / (L_r L_s - L_m^2)$,其值相对于 ω_1 而言很小,所以在暂态过程中认为传递函数近似为式(16)所示。

$$G_1(s) \approx 1/k_p \quad (16)$$

从而可以得到转子磁链 d 轴的动态分量为:

$$\Delta\psi_{rd} \approx e_d / k_p \quad (17)$$

同理可得到:

$$\Delta\psi_{rq} \approx e_q / k_p \quad (18)$$

其中, $e_q = -L_m R_r \Delta\psi_{sq} / (L_r L_s - L_m^2)$; $\Delta\psi_{sq}$ 为定子磁链的

q 轴动态分量。

约去定子电流,可以得到:

$$i_{rd} = \frac{L_s \psi_{rd} - L_m \psi_{sd}}{L_r L_s - L_m^2} \quad (19)$$

在 Crowbar 切除的过程中,定子电流 d 轴的动态分量为:

$$\Delta i_{rd} = \frac{L_s}{L_r L_s - L_m^2} \Delta\psi_{rd} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \Delta\psi_{sd} \quad (20)$$

再综合式(17)、(18)得到的转子电流 d 轴动态分量,可得:

$$\Delta i_{rd} = -\frac{L_m (R_r + \sigma k_p L_r)}{\sigma^2 k_p L_s L_r^2} \Delta\psi_{sd} \quad (21)$$

其中, σ 为双馈发电机的漏磁系数。

同理可以得到转子电流 q 轴动态分量:

$$\Delta i_{rq} = -\frac{L_m (R_r + \sigma k_p L_r)}{\sigma^2 k_p L_s L_r^2} \Delta\psi_{sq} \quad (22)$$

从式(21)和式(22)可以看出,将转子磁链控制环设计成典型 I 型系统时,Crowbar 切除过程中的转子电流动态分量正比于定子磁链动态分量,在控制系统稳定的前提下增大 PI 调节器的比例增益 k_p 可以减小转子电流动态分量,但是过大的 k_p 会造成系统失稳,所以该方法可行性不高。

由式(17)可知,转子磁链 d 轴的动态分量与 e_d 相位相同,结合式(21)知,转子磁链 d 轴的动态分量实际上助长了转子电流的振荡,因此必须对控制环路进行适当改造使得转子磁链 d 轴的动态分量迅速衰减或者与 e_d 相位相反,抵消由定子磁链动态变化引起的转子电流变化。

由前文分析知,转子磁链动态分量的传递函数近似为 $1/k_p$,考虑到 $\Delta\psi_{sd}$ 中仅含有角频率为 $\omega = \omega_1$ 的分量,所以引入一个谐振调节器,如图 7 所示,则 e_d 到 $\Delta\psi_{rd}$ 的传递函数为:

$$\frac{\Delta\psi_{rd}}{e_d} = \frac{s^2 + \omega_1^2}{k_p s^2 + k_r s + k_p \omega_1^2} \quad (23)$$

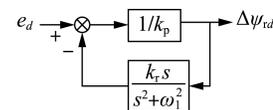


图 7 加入谐振调节器的动态过程中扰动量回路

Fig.7 Disturbance closed loop in dynamic process adding PR regulator

e_d 仅含有角频率为 $\omega = \omega_1$ 的分量,所以可消除定子磁链动态分量对转子磁链的作用。

得到的转子磁链动态分量为:

$$\frac{\Delta\psi_{rd}}{e_d} \approx 0 \quad (24)$$

代入式(21)后得到:

$$\Delta i_{rd} = -\frac{L_m R_r}{\sigma^2 k_p L_s L_r^2} \Delta \psi_{sd} \quad (25)$$

比较式(21)和式(25)可知,引入谐振调节器后并不影响原有控制能力,即保留了系统稳定较快的特点,同时又可以抑制 Crowbar 切除后转子电流的动态分量。因此本节提出的转子侧变流器改进的 SVM-DPC 策略在 LVRT 方面具有明显优势。

4 硬件在环仿真实验

4.1 电磁暂态对比分析

使用 RTDS 建立主电路仿真模型,控制系统使用实际硬件控制器构成半实物硬件在环系统。主电路模型按图 8 所示建构。各部分参数如下:风力机额定风速为 11.6 m/s;DFIG 额定功率为 2 MW,定子额定电压为 690 V,额定频率为 50 Hz,极对数为 3,定子电阻为 0.004 89 p.u.,定子漏感为 0.092 4 p.u.,转子电阻为 0.005 5 p.u.,转子漏感为 0.099 6 p.u.,互感为 3.954 p.u.,惯量为 1.5 s,初始转速为 1.14 p.u.;双 PWM 型变流器直流环节电容为 10 mF,直流环节电压额定值为 1 100 V,电抗器电感为 0.4 mH,从控制器接收的驱动信号开关频率为 3 kHz;机组出口变压器变比为 35 kV/690 V,原边/副边为 Y/Δ 连接方式,变压器容量为 2.5 MV·A;电网选用无穷大电源代替 10 kV 电网系统。

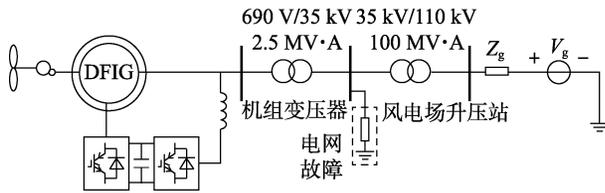


图 8 电网故障下的仿真系统主电路

Fig.8 Main circuit of simulation system with grid fault

为考察矢量控制和 SVM-DPC 这 2 种控制方法的动态性能,风速恒定为 8 m/s,且设置 $t=0.3$ s 时电网在 35 kV 母线处发生对称性三相短路故障,如图 8 所示。

发生故障后定子侧电压由 1.0 p.u. 下降至 0.85 p.u.,如图 9 所示,且在该暂态过程中没有 Crowbar 等保护装置动作,机组不脱网运行向电网持续供电。

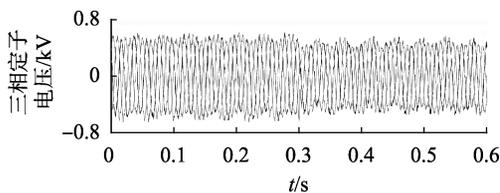


图 9 三相定子电压

Fig.9 Three-phase stator voltage

图 10 为定子磁链波形,可以看出电压跌落导致定子磁链中出现直流分量,在 dq 旋转坐标系上体现为频率为电网频率的振荡分量,2 种控制方式下,定子磁链直流分量均能得到衰减,但 SVM-DPC 使定子磁链衰减更快,所以 SVM-DPC 的“直流灭磁”效果明显优于矢量控制。

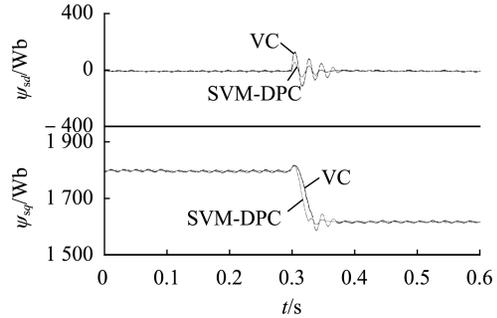


图 10 定子磁链 d, q 轴分量

Fig.10 d - and q -axis components of stator flux linkage

图 11 和图 12 分别为三相定子电流波形和定子电流在 dq 旋转坐标系中分量波形,可以看出 SVM-DPC 方式下,由于定子磁链直流分量衰减较快,定子电流也能更快趋于稳定。与第 2 节分析一致,在发生电压跌落时,SVM-DPC 进入稳态的时间小于矢量控制。

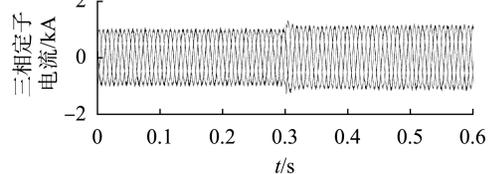
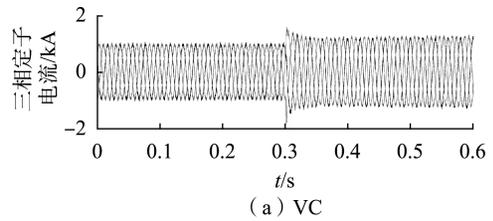


图 11 三相定子电流

Fig.11 Three-phase stator current

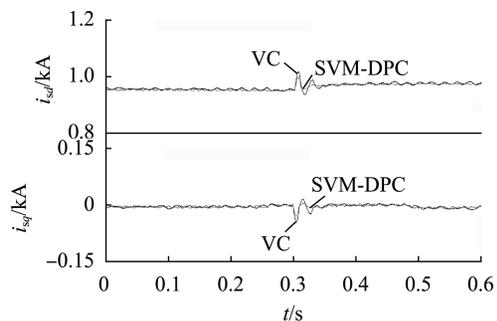


图 12 定子电流 d, q 轴分量

Fig.12 d - and q -axis components of stator current

图 13 为三相转子电流,图 14 为转子电流 d 、 q 轴分量的波形。可以看出,由于矢量控制直接控制转子电流,因此在动态过程中转子电流超调更小,而 SVM-DPC 未控制转子电流,在动态过程中电流超调较大,更易引起 Crowbar 动作,但转子电流恢复稳定的时间要早于矢量控制。

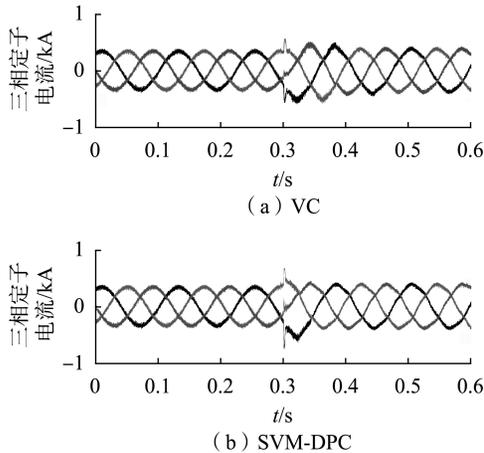


图 13 三相转子电流

Fig.13 Three-phase rotor current

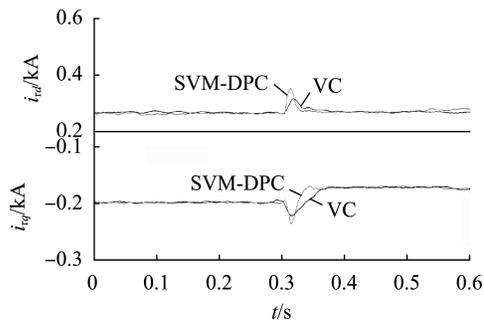


图 14 转子电流 d 、 q 轴分量

Fig.14 d - and q -axis components of rotor current

图 15 为电网电压跌落时转子磁链 d 、 q 轴分量的波形,可以看出 SVM-DPC 直接控制转子磁链,动态过程中转子磁链几乎无变化,而矢量控制下转子磁链有明显的暂态分量。

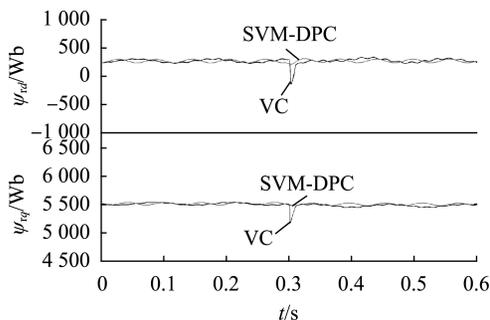


图 15 转子磁链 d 、 q 轴分量

Fig.15 d - and q -axis components of rotor flux linkage

综合上述仿真实验结果,在电网电压跌落的双馈电机暂态过程中,与矢量控制相比,SVM-DPC 具

有使系统快速稳定的明显优势。但 SVM-DPC 方式下,转子电流超调更大,更易引起 Crowbar 动作,因此在 LVRT 期间,使用 SVM-DPC 需要解决转子电流超调大的问题。

4.2 改进直接功率控制

仿真主电路中 Crowbar 电阻为 0.25Ω ,风速恒定为 8 m/s ,且 $t=1 \text{ s}$ 时电网 35 kV 母线处发生对称性三相短路故障,定子侧电压由 1.0 p.u. 下降至 0.25 p.u. 左右,并在 625 ms 后恢复。为降低转子暂态电流影响,避免 Crowbar 重新动作,设置在 $t=1.675 \text{ s}$ 时切除 Crowbar,之后恢复 PWM 变换器对机组的功率控制。

图 16 为转子电流 d 、 q 轴分量的波形图,可以看出,在 Crowbar 投入期间,转子侧变换器闭锁,3 种控制方式在 Crowbar 投入期间转子电流特性基本一致。而当 Crowbar 切除后,3 种控制方式均能实现转子电流的稳定,矢量控制下转子电流变化幅度较小,但稳定时间也较长。SVM-DPC 下转子电流能较快稳定,但 Crowbar 切除瞬间转子电流变化幅度较大,接近 Crowbar 设定的动作阈值 1.05 p.u. ,极易引起 Crowbar 再次动作。改进后的 SVM-DPC 可以在 Crowbar 切除后抑制转子电流的剧烈变化,并使得转子电流快速进入稳定状态,与传统的 SVM-DPC 控制相比具有明显的优势。

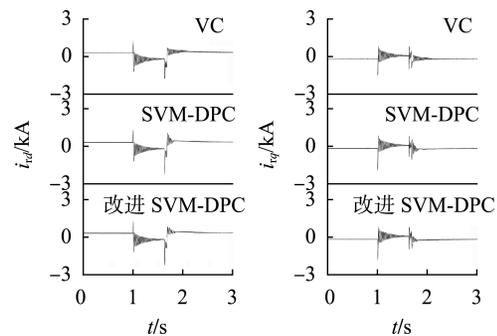
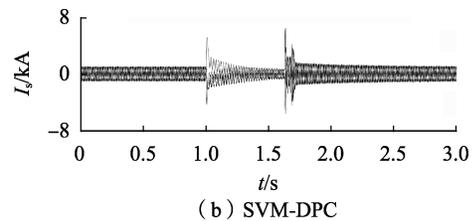
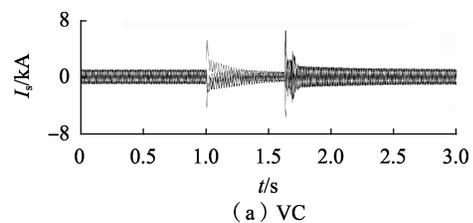


图 16 3 种控制策略下转子电流 d 、 q 轴分量

Fig.16 d - and q -axis components of rotor current under three control strategies

图 17 为定子三相电流的波形图,在 Crowbar 切



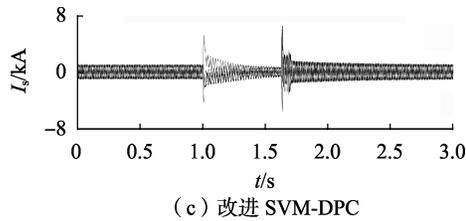


图 17 3 种控制策略下的定子电流

Fig.17 Stator currents under three control strategies

除后,与矢量控制相比,SVM-DPC 和改进 SVM-DPC 下的定子电流均能快速趋于稳定。

5 结论

本文针对双馈风电机组直接功率控制 LVRT 期间易引起 Crowbar 再动作的问题,分析电压跌落前后 DFIG 定子磁链轨迹变化趋势,指出同矢量控制相比,双馈风电机组的直接功率控制更有利于电磁暂态过程中的直流灭磁,但同时导致转子电流振荡较严重,进而提出一种改进控制方法,通过在转子磁链的控制环路中增加谐振调节器,改善双馈风电机组 LVRT 特性,使机组在 Crowbar 切除后快速稳定且不会引起 Crowbar 再次动作,最后通过硬件在环仿真比较了矢量控制、直接功率控制和改进直接功率控制的控制效果,验证了改进控制方法的可行性。具体结论如下:

(1) 在双馈风电机组的暂态灭磁过程中,采用转子侧变流器的矢量控制可近似认为转子电流为常数,采用直接功率控制可近似认为转子磁链为常数,且直接功率控制更利于直流灭磁,抑制系统振荡;

(2) 由于双馈风电机组的直接功率控制本质上是控制转子磁链而非转子电流,因此将导致转子电流的严重振荡,并且在 Crowbar 切除后更容易引起 Crowbar 再次动作;

(3) 提出一种改进的双馈风电机组直接功率控制方式,通过在转子磁链的控制环路中增加谐振调节器使得系统保留稳定较快的特点,同时又可以抑制 Crowbar 切除后转子电流的动态分量,在 LVRT 方面具有明显优势。

值得注意的是,本文所提的改进控制策略主要针对电网电压对称故障进行理论分析与实验验证,电网电压不对称故障下的机理分析仍有待进一步研究。另外需要注意的是,对于电网故障中风电机组的无功功率控制也有重要意义。因此后续研究将主要围绕以上 2 个问题展开,最终形成系统的直接功率控制暂态控制策略。

参考文献:

[1] 刘其辉,毛未,高瑜. 提升无功调节能力的双馈式风力发电机转速变模式控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):85-92.
LIU Qihui, MAO Wei, GAO Yu. Variant mode control strategy of ro-

tor speed for DFIG in promoting reactive power adjustment ability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 85-92.

[2] 吴汪平,楚皓翔,解大,等. PI 控制器参数对并网永磁直驱型风力发电系统电网相互作用的影响[J]. 电力自动化设备,2017, 37(10):21-28.
WU Wangping, CHU Haoxiang, XIE Da, et al. Influence of PI controllers' parameters on machine-network interaction of grid-connected PMSG system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 21-28.

[3] 姜惠兰,周陶,贾燕琪,等. 提高 DFIG 低电压穿越性能的转子 Crowbar 自适应切除控制方法[J]. 电力自动化设备,2018, 38(9):93-98.
JIANG Huilan, ZHOU Tao, JIA Yanqi, et al. Adaptive deactivating control strategy of Crowbar for LVRT capability enhancement of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 93-98.

[4] 刘其辉,韩贤岁. 双馈风电机组的通用型机电暂态模型及其电磁暂态模型的对比分析[J]. 电力系统保护与控制,2014, 42(23):89-94.
LIU Qihui, HAN Xiansui. Comparative study on electromechanical and electromagnetic transient model for grid-connected DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 89-94.

[5] 孙丽玲,邢东霞. 接于弱电网的双馈感应发电机在定子故障情况下的无功功率控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6): 41-45.
SUN Liling, XING Dongxia. Reactive power control strategy of DFIG connected to weak network with stator fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 41-45.

[6] 凌禹,窦真兰. 基于 DVR 的双馈风电机组不对称电压故障穿越[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):65-70,77.
LING Yu, DOU Zhenlan. Asymmetrical voltage fault ride-through of wind turbine with DFIG using DVR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 65-70, 77.

[7] LI Shuishui, TIMOTHY A H, KEITH A W, et al. Control of DFIG wind turbine with direct-current vector control configuration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 3(1): 1-11.

[8] XU H, ZHANG W, NIAN H, et al. Improved vector control of DFIG based wind turbine during grid dips and swells [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems. Incheon, Korea: IEEE, 2010: 511-515.

[9] 杨睿茜,陈红坤,陶玉波,等. 双馈式风机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制,2015, 43(2):63-69.
YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, et al. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.

[10] 孙丹,邓伦杰,孙士涛,等. 双馈异步风力发电机优化预测直接功率控制[J]. 电工技术学报,2013, 28(11):78-85.
SUN Dan, DENG Lunjie, SUN Shitao, et al. Modified predictive direct power control of doubly fed induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 78-85.

[11] XU Lie, PHILLIP C. Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 750-758.

[12] XU Lie, PHILLIP C. Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 110-118.

[13] KAZEMI M V, YAZDANKHAH A S, KOJABADI H M. Direct power control of DFIG based on discrete space vector modulation [J]. Renewable Energy, 2010, 35(5): 1033-1042.

- [14] 管萍,董玲玲,杨秀媛. 双馈风力发电机终端滑模变结构的直接功率控制[J]. 电力电子技术, 2017, 51(9): 92-95.
GUAN Ping, DONG Lingling, YANG Xiuyuan. Direct power control for doubly fed induction generator based on integral terminal sliding mode variable[J]. Power Electronics, 2017, 51(9): 92-95.
- [15] 赵一心. 结合矢量和直接功率控制的双馈风电机组研究[J]. 微特电机, 2017, 45(4): 71-76.
ZHAO Yixin. Study of the combined vector and direct power control for DFIG-based wind turbines[J]. Small & Special Electrical Machines, 2017, 45(4): 71-76.
- [16] 杨国良,郭永爱,李雅静,等. 三电平永磁直驱风电系统直接功率控制[J]. 电力电子技术, 2017, 51(3): 89-92.
YANG Guoliang, GUO Yongai, LI Yajing, et al. Three-level permanent magnet direct-drive wind power system based on direct power control[J]. Power Electronics, 2017, 51(3): 89-92.
- [17] ABAD G, RODRIGUEZ M A, POZA J. Two-level VSC-based predictive direct power control of the doubly fed induction machine with reduced power ripple at low constant switching frequency[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 570-580.
- [18] 李生民,何欢欢,张玉坤,等. 基于滑模变结构的双馈风力发电机直接功率控制策略研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2006-2010.
LI Shengmin, HE Huanhuan, ZHANG Yukun, et al. A sliding mode variable structure-based direct power control strategy for doubly fed induction generator[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2006-2010.
- [19] 郝正航,余贻鑫. 励磁控制引起的双馈风电机组传动系统扭振机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 81-86.
HAO Zhenghang, YU Yixin. Analysis on wind turbine driven DFIG shaft torsional oscillation mechanism caused by excitation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 81-86.
- [20] 张琛,李征,高强,等. 双馈风电机组的不同控制策略对轴系振荡的阻尼作用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 135-144.
ZHANG Chen, LI Zheng, GAO Qiang, et al. Damping effects on torsional oscillation of DFIG drive-chain using different control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 135-144.
- [21] 金石,王代睿,张凤阁,等. 开绕组无刷双馈风力发电机的直接功率控制研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 616-622.
JIN Shi, WANG Dairui, ZHANG Fengge, et al. Study on direct power control of open-winding brushless doubly-fed wind power generator[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(3): 616-622.
- [22] 年珩,程晨闻,宋亦鹏,等. 谐波电网下基于重复控制的双馈风力发电机直接功率控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 407-416.
NIAN Heng, CHENG Chenwen, SONG Yipeng, et al. A direct power control technique of DFIG based on repetitive control in generalized harmonic power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 407-416.

作者简介:



邵昊舒

邵昊舒(1993—),男,江苏连云港人,博士研究生,主要研究方向为高比例友好型风电并网技术(E-mail: shaohaoshu1208@sjtu.edu.cn);

王磊(1992—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向为风力发电并网技术及应用(E-mail: wl2014@sjtu.edu.cn);

蔡旭(1964—),男,江苏徐州人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为大功率电力电子、可再生能源并网技术(E-mail: xucai@sjtu.edu.cn)。

Modified direct power control for improving LVRT ability of doubly fed induction generator

SHAO Haoshu, WANG Lei, CAI Xu

(Wind Power Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: When the traditional DPC (Direct Power Control) is adopted in doubly fed induction generator system, the large rotor oscillation current after LVRT (Low-Voltage Ride-Through) may cause re-operation of Crowbar. The model of doubly fed induction generator system with traditional DPC is built, and the restraining effect of LVRT with vector control and DPC is analyzed, on this basis, an improved DPC method is proposed. The resonant controller is introduced to eliminate the impact of stator flux dynamic component on rotor flux, restrain the rotor flux dynamic component after cutting out Crowbar, thus improving LVRT characteristic of doubly fed induction generator. Simulation and comparison verify the feasibility of the proposed control method in doubly fed induction generator system, the proposed method makes the system recover stability more quickly than vector control, and has more obvious effect on restraining rotor current oscillation than the traditional DPC.

Key words: direct power control; vector control; doubly fed induction generator; low-voltage ride-through